

На правах рукописи

МИНГУЛОВ ХАМЗЯ ИЛЬЯСОВИЧ

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА
В ИСПАРИТЕЛЬНОМ ТЕПЛООБМЕННИКЕ**

01.02.05 - Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Казань 2013

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО "Самарский государственный университет"

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой математического
моделирования в механике
ФГБОУ ВПО "Самарский государственный
университет"
Клюев Николай Ильич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
кафедры аэрогидромеханики
ФГАОУ ВПО "Казанский (Приволжский)
федеральный университет"
Мазо Александр Бенцианович

доктор технических наук, профессор кафедры
теплотехники и тепловых двигателей" ФГБОУ ВПО
"Самарский государственный аэрокосмический
университет (национальный исследовательский
университет)"
Бирюк Владимир Васильевич

Ведущая организация - Федеральное государственное унитарное
предприятие «Государственный научно-
производственный ракетно-космический центр
"ЦСКБ-Прогресс"» (г. Самара)

Защита состоится 30 мая 2013 г. в 14 ч 30 мин на заседании диссертационного
совета Д 212.081.11 при ФГАОУ ВПО "Казанский (Приволжский)
федеральный университет" по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18,
ауд. мех. 2

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке им. Н.И. Лобачев-
ского ФГАОУ ВПО "Казанский (Приволжский) федеральный университет"
по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18

Автореферат разослан 24 апреля 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к. ф.-м. н., доцент

Саченков А.А.

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Использование криогенного топлива для двигателей ракет-носителей (РН) является перспективным направлением в ракетостроении и сопровождается сложными физическими процессами. Жидкое топливо перед поступлением в камеру сгорания претерпевает фазовые превращения. Процесс газификации криогенного топлива включает в себя ряд специфических режимов течения: это пленочное испарение жидкости с образованием двухфазной парокапельной смеси и последующим формированием однородной паровой фазы.

Подобные процессы протекают в испарительно-конденсационных теплообменниках, тепловых трубах и т.д. Математическим моделированием таких процессов в разное время занимались Д.Р. Квейл и Е.К. Леви, П.И. Быстров и В.С. Михайлов, В.Я. Сасин и А.Я. Щелгинский, которые рассматривали гидродинамические задачи о течении пара в цилиндрическом канале с переменным расходом массы. Численные решения ряда задач теплообмена с испарением и конденсацией получены А.Б. Мазо.

Современный уровень развития техники и технологии ставит перед исследователями задачи по интенсификации указанных процессов, поэтому математическое моделирование становится необходимым начальным этапом проектирования.

Актуальность работы обусловлена необходимостью математического моделирования процессов тепло- и массопереноса в испарительно-конденсационных теплообменниках.

Целью работы является разработка математических моделей гидродинамических и тепловых процессов в двухфазных системах теплового регулирования.

В соответствии с поставленной целью были определены следующие **задачи исследования:**

- 1) выполнить решение задачи о течении пара с переменным расходом массы в цилиндрическом канале для чисел Рейнольдса $Re \geq 100$ методом асимптотических сращиваний; получить численное решение задачи для течения пара в цилиндрическом испарителе при числах Рейнольдса $0 < Re \leq 40$;

2) осуществить численное моделирование гидродинамической задачи о течении пара в плоском канале испарителя для чисел Рейнольдса $1 \leq Re \leq 50$;

3) исследовать режим течения одиночной испаряющейся капли в потоке Пуазейля;

4) смоделировать процессы тепло- и массообмена при конденсации пара на плоской вертикальной стенке с учетом конвективных слагаемых уравнения движения и воздействия внешнего потока пара на пленку конденсата.

Методы исследования. Для решения поставленных задач были использованы методы механики жидкости и газа. При построении математических моделей применялись методы теории подобия и размерности, разложение по малому параметру и сращивание асимптотических разложений.

Расчеты выполнялись с использованием пакетов прикладных программ Mathcad и STAR CD.

Научной новизной обладают следующие результаты диссертационной работы:

1. Решение нелинейного дифференциального уравнения третьего порядка с малым параметром при старшей производной методом асимптотических сращиваний. Численное решение задачи для течения пара в цилиндрическом испарителе в диапазоне $0 < Re \leq 40$.

2. Численное моделирование и результаты решения задачи о течении пара в плоском канале испарителя в пакете прикладных программ STAR CD для $1 \leq Re \leq 50$.

3. Методика определения пространственного положения испаряющейся капли и угловой скорости вращения вокруг собственной продольной оси симметрии в потоке Пуазейля. Впервые смоделирован колебательный процесс движения капли в потоке газа с поперечным градиентом скорости.

4. Математическая модель тепло- и массопереноса и результаты расчета характеристик жидкости в пленке конденсата, стекающей под действием силы тяжести по плоской вертикальной стенке с учетом конвективных слагаемых уравнений движения и воздействия внешнего потока пара на пленку конденсата.

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректностью применяемых моделей жидкости и газа и используемых допущений при составлении расчетных моделей потока, а также сравнением с известными теоретическими и экспериментальными данными.

Практическая ценность. Разработанные модели тепло- и массопереноса были использованы в отчетах ФГУП ГНПРКЦ "ЦСКБ-Прогресс" в рамках реализации федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы" по НИР "Разработка методов исследования гидродинамики жидкого топлива в баках перспективных РН". Полученные математические модели используются при чтении спецкурсов для магистров по направлению подготовки 010800 "Механика и математическое моделирование" СамГУ.

Положения, выносимые на защиту.

1. Решение нелинейного дифференциального уравнения третьего порядка с малым параметром при старшей производной методом асимптотических сращиваний. Численное решение задачи для течения пара в цилиндрическом испарителе в диапазоне $0 < Re \leq 40$.

2. Численное моделирование и результаты решения задачи о течении пара в плоском канале испарителя в пакете прикладных программ STAR CD для $1 \leq Re \leq 50$.

3. Математическое моделирование гидродинамических характеристик для испаряющейся капли в потоке газа с поперечным градиентом скорости. Методика позволяет определять положение капли в канале и ее вращение вокруг собственной продольной оси симметрии, время испарения капли. Расчетная методика установления гидродинамических характеристик испаряющейся капли ограничена минимальным размером капли $r = 0,012 \cdot 10^{-3}$ м.

4. Математическая модель тепло- и массопереноса для пленочной конденсации на плоской вертикальной стенке с учетом конвекции и взаимодействия с внешним потоком пара.

Апробация результатов. Основные результаты, полученные в диссертации, докладывались и обсуждались:

1) на научном семинаре кафедры математического моделирования в механике Самарского государственного университета (Самара, 2011 - 2012);

2) научной конференции преподавателей и сотрудников Самарского государственного университета (Самара, 2011 - 2012);

3) Всероссийской научно-практической конференции "Системы обеспечения тепловых режимов преобразователей энергии" (Махачкала, 2008);

4) X Всероссийском симпозиуме по прикладной и промышленной математике (Сочи - Дагомыс, 2009);

5) XXXII Всероссийской конференции по проблемам науки и технологии (Миасс Челябинской области, 2012).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 работ, в том числе 3 в журналах из списка ВАК.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка. В конце каждой главы сформулированы выводы. Диссертация изложена на 102 страницах и содержит 44 рисунка, 1 таблицу и 147 единиц библиографии.

Содержание работы.

Во введении рассмотрены вопросы, связанные с исследованием тепло- и массопереноса в двухфазных системах теплового регулирования. Из аналитического обзора определены задачи, которые требуют математического моделирования тепловых и гидродинамических процессов в испарительном теплообменнике уже на этапе предварительного проектирования. Сформулированы цели и задачи диссертационного исследования, обоснована актуальность его темы, представлена научная новизна, описан объект исследования, сформулированы его цели, отражены структура диссертации и ее краткое содержание по главам, приведены сведения об апробации полученных результатов и о публикациях по избранной теме.

В первой главе решена гидродинамическая задача о течении пара в цилиндрическом испарителе-конденсаторе двухфазного теплообменника. Массоперенос организован по принципу тепловой трубы с сетчатой капиллярной структурой в горизонтальном канале.

Течение пара представляет собой течение со вдувом-отсосом массы и описывается системой уравнений в безразмерном виде:

$$\frac{1}{r^3} \left[r^2 w''' - r w'' + w' + \text{Re} \left(r w'^2 - r w w'' + w w' \right) \right] = k, \quad (1)$$

$$\text{испаритель: } v = -\frac{y}{r} \frac{\partial w}{\partial r}, -\frac{1}{y} \frac{\partial p}{\partial y} = k;$$

конденсатор: $v = \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \left(\frac{\ell}{R} - y \right), \frac{1}{\left(\frac{\ell}{R} - y \right)} \frac{\partial p}{\partial y} = k;$

граничные условия задачи имеют следующий вид:

$$r = 0: \quad w = 0, \quad \lim_{r \rightarrow 0} \left(w'' - \frac{w'}{r} \right) = 0; \quad r = 1: \quad w = \pm 1, \quad w' = 0; \quad (2)$$

где r, y – поперечная и продольная координаты; w, v – поперечная и продольная скорости, $w = 1$ (для конденсатора), $w = -1$ (для испарителя); k – неизвестная константа; p – давление; штрих означает производную по r ; R – радиус канала; ℓ – длина канала.

Решение выполнено методом асимптотических сращиваний для конденсатора. Область решения определена как $Re \geq 100$. Поперечная и продольная скорости для испарителя:

$$w = -r^2 + \frac{2}{Re} r^{Re}, \quad v = 2y(1 - r^{Re-2}).$$

На рисунках 1 и 2 показаны характеристики течения для парового потока.

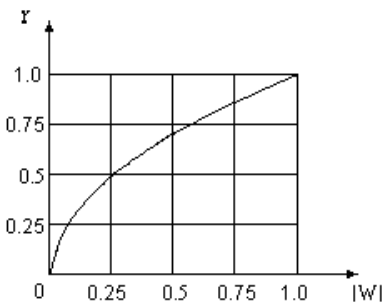


Рисунок 1. Изменение поперечной скорости: $Re = 100$

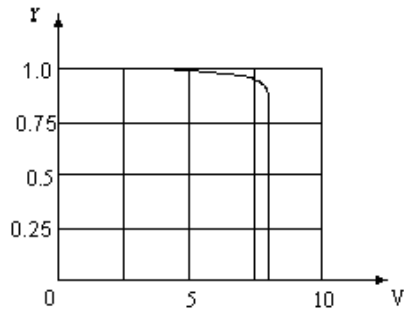


Рисунок 2. Изменение продольной скорости: $\bar{y} = 1, Re = 100$

Из графика на рисунке 2 видно, что в окрестности точки $r = 1$ располагается математический пограничный слой. Поле скоростей совпадает с известным результатом с точностью, не превышающей 6%. Сравнение с экспериментом дает расхождение 23,5%.

Выполнено численное решение задач (1), (2) в пакете прикладных программ Mathcad в диапазоне чисел Рейнольдса $0 < Re \leq 40$. Сравнение с экспериментальными данными дает различие $\approx 10\%$.

Во второй главе выполнено численное моделирование задачи (в пакете STAR CD) о течении пара в зоне испарения плоского теплообменника при числах Рейнольдса $1 \leq Re \leq 50$.

Математическая постановка задачи имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} u + \frac{\partial u}{\partial y} v &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right), \quad \frac{\partial v}{\partial x} u + \frac{\partial v}{\partial y} v = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right), \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} &= 0, \\ y = 0 : v = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial y} &= 0; \quad y = \frac{\delta}{2} : v = const, \quad u = 0; \quad x = 0 : v = u = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

На рисунке 3 приведены эпюры продольных скоростей вблизи закрытого конца канала. Видно, как наполняется профиль продольной скорости по мере отхода от закрытого конца канала.



Рисунок 3. Продольная скорость для $x=0,1$; $x=0,2$; $x=0,3$ и $Re=1$

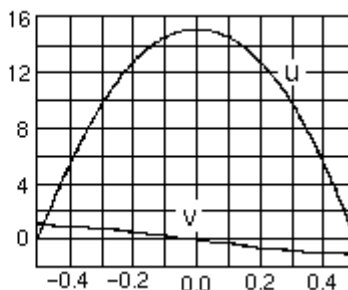


Рисунок 4. Продольная и поперечная скорости для $x=5$ и $Re=5$

На рисунке 4 показаны эпюры поперечной и продольной скоростей в середине канала. Для $x > 0,3$ поперечная скорость движения не зависит от продольной координаты.

В третьей главе рассматривается испарение капли в градиентном потоке газа. Считаем каплю сферой радиуса a , которая движется в горизонтальном цилиндрическом канале радиуса R вместе с потоком газа.

Математическая модель имеет вид:

Уравнение продольного движения: $m \frac{d^2 x}{dt^2} = F_x + F_m, \quad (4)$

$$F_x = 6\pi\mu_1 a \left[2\bar{V}_1 \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) - \frac{dx}{dt} \right] \left(1 - \frac{3}{16} \text{Re} \right) \left[1 + f \left(\frac{r}{R} \right) \frac{a}{R} \right] - \frac{2}{3} \pi \rho_1 a^3 \frac{d^2 x}{dt^2},$$

$$F_m = 2\pi a^2 \rho \left(2\bar{V}_1 \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) - \frac{dx}{dt} \right) \frac{da}{dt},$$

где F_x определяется формулой Буссинеска; F_m - реактивная сила Ме-
щерского; индексом "1" обозначены параметры воздуха; t - время;
 \bar{V}_1 - средняя скорость потока; $f(r/R)$ - известная функция эксцен-
триситета; ρ - плотность, μ - динамическая вязкость; m - масса капли.

Радиальное движение: $m \left[\frac{d^2 r}{dt^2} - r \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 \right] = F_r + F_{gr} + F_b, \quad (5)$

где, соответственно, силы лобового сопротивления, сила тяжести и сила
Архимеда, сила Бернулли рассчитываются по формулам

$$F_r = -6\pi\mu_1 a \frac{dr}{dt} - \frac{2}{3} \pi \rho_1 a^3 \left[\frac{d^2 r}{dt^2} - r \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 \right], \quad F_{gr} = \frac{4}{3} \pi a^3 (\rho_2 - \rho_1) g \sin \varphi,$$

$$F_b = -\frac{\pi \rho_1 a^2}{2} \left\{ \left[2\bar{V}_1 \left[1 - \frac{(r-a)^2}{R^2} \right] \right]^2 - \left[2\bar{V}_1 \left[1 - \frac{(r+a)^2}{R^2} \right] \right]^2 \right\}.$$

Поперечное движение: $m \left[r \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + 2 \frac{dr}{dt} \frac{d\varphi}{dt} \right] = F_\varphi + F_{g\varphi}, \quad (6)$

где, соответственно, сила лобового сопротивления, сила тяжести и сила
Архимеда:

$$F_\varphi = -6\pi\mu_1 a r \frac{d\varphi}{dt} - \frac{2}{3} \pi \rho_1 a^3 \left[r \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + 2 \frac{dr}{dt} \frac{d\varphi}{dt} \right],$$

$$F_{g\varphi} = \frac{4}{3} \pi a^3 (\rho_2 - \rho_1) g \cos \varphi.$$

Уравнение вращательного движения капли:

$$\frac{2}{5} m a^2 \frac{d\omega}{dt} = 8\pi\mu_1 a^2 \left[2\bar{V}_1 \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) - \frac{dx}{dt} \right] f_1 \left(\frac{r}{R} \right) \left(\frac{a}{R} \right)^2, \quad (7)$$

где $f_1(r/R)$ – известная функция эксцентриситета; ω – угловая скорость вращения капли.

К уравнениям движения добавим уравнение массообмена:

$$\frac{dm}{dt} = -k_c (C_w - C_1) S M, \quad (8)$$

где k_c – коэффициент массообмена; C_w – молярная концентрация пара у поверхности капли; C_1 – молярная концентрация пара в потоке воздуха; M – молярная масса вещества капли; S – площадь поверхности.

Начальные условия:

$$t = 0, x = 0, r = b, \varphi = \varphi_0, dx/dt = 0, dr/dt = 0, d\varphi/dt = 0, \omega = 0. \quad (9)$$

Решение выполнено в пакете Mathcad.

На рисунках 5 - 11 показаны сравнительные характеристики пространственного движения капли постоянного радиуса (1) и испаряющейся капли (2). Для того чтобы выполнить сравнение характеристик движения испаряющейся капли с движением капли без испарения, был выбран интервал времени $0 < t < 0,6$ с, в течение которого заканчивается колебательный процесс движения. Продольное перемещение и продольная скорость представлены на графиках (рисунках 5 - 6).

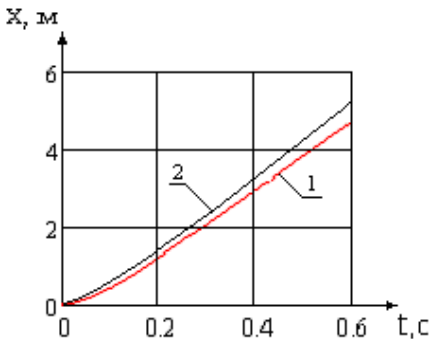


Рисунок 5. Изменение продольной координаты

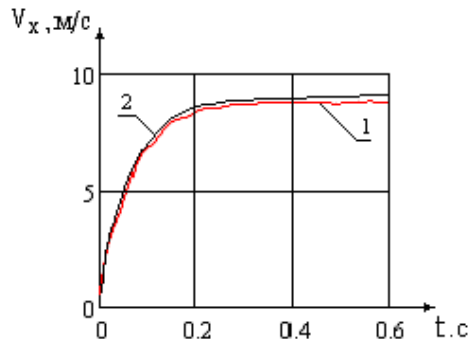


Рисунок 6. Изменение продольной скорости

Сравнивая режимы движения, видим, что испаряющаяся капля движется быстрее. На рисунках 7 - 8 показано изменение радиальных характеристик испаряющейся капли и капли с постоянным радиусом.

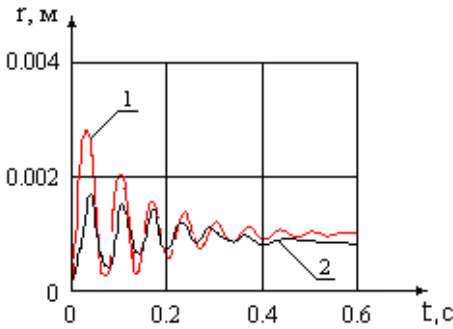


Рисунок 7. Изменение радиальной координаты

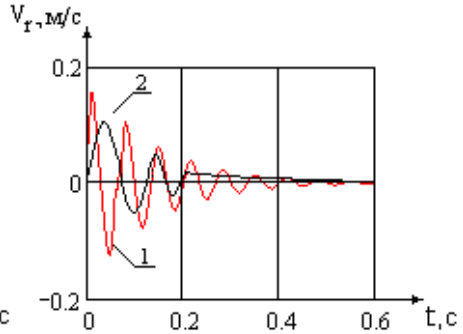


Рисунок 8. Изменение радиальной скорости

Из рисунков видно, что движение носит колебательный характер, колебания испаряющейся капли имеют меньшую амплитуду и затухают быстрее по сравнению с колебаниями капли постоянного радиуса. Устойчивое положение испаряющейся капли сдвигается к оси симметрии канала (рисунок 7).

На рисунках 9 - 10 показано изменение полярного угла и угловой скорости вращения капли вокруг собственной оси симметрии.

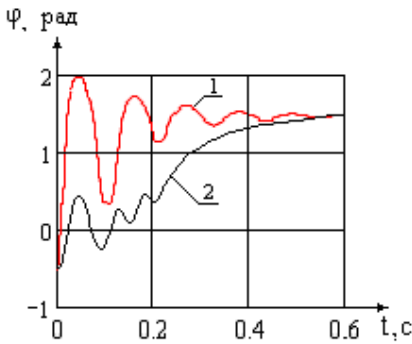


Рисунок 9. Изменение полярного угла

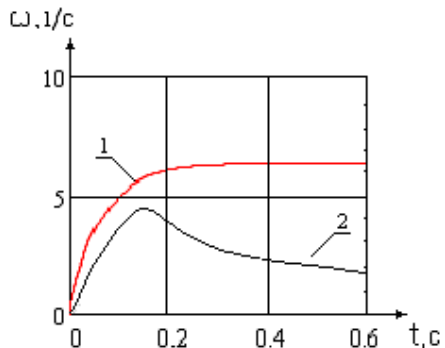


Рисунок 10. Изменение угловой скорости вращения капли

Из рисунков 9-10 видно, что испаряющаяся капля так же, как и капля постоянного радиуса, перемещается в плоскость вертикальной симметрии канала, а угловая скорость вращения капли вокруг собственной оси симметрии уменьшается. На рисунке 11 показано изменение радиуса испаряющейся капли.

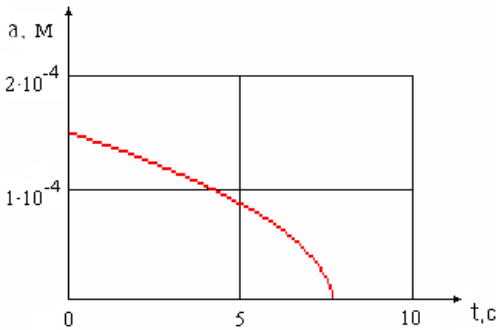


Рисунок 11. Изменение радиуса капли с течением времени

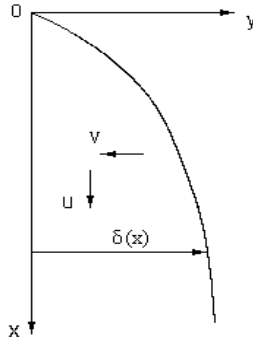


Рисунок 12. Схема течения пленки конденсата:

δ - толщина пленки;

u, v - компоненты вектора скорости

Из рисунка 11 видно, что полное испарение капли происходит через $t = 7,5$ с от начала процесса.

В четвертой главе рассматривается гидродинамическая и тепловая задачи стекания пленки конденсата по плоской вертикальной стенке. На рисунке 12 представлена схема течения пленки конденсата.

Стационарные поля продольной u и поперечной v скорости жидкости в пленке конденсата толщиной $\delta(x)$ описываются уравнениями Навье - Стокса для несжимаемой жидкости и конвективной теплопроводности в приближении пограничного слоя. На стенке задаются условие прилипания для жидкости и фиксированная температура. На межфазной границе $y = \delta(x)$ задается температура T_s насыщенного пара, напряжение трения τ между жидкостью и движущимся паром, а также условие фазового перехода для скорости конденсации. Сформулирована постановка задачи в безразмерных переменных:

$$\varepsilon \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + 1, \quad \varepsilon = \text{Re} \frac{\delta_0}{l}, \quad \text{Re} = \frac{u_0 \delta_0}{\nu}; \quad (10)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0; \quad 0 < x < 1, \quad 0 < y < \delta(x); \quad (11)$$

$$\varepsilon \text{Pr} \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}, \quad \text{Pr} = \frac{\nu}{a}; \quad (12)$$

$$y = 0: \quad u, v = 0; \quad T = 0; \quad (13)$$

$$y = \delta(x): \quad v = -\frac{\partial T}{\partial y} + u\delta'; \quad T = 1; \quad \frac{\partial u}{\partial y} = \tau. \quad (14)$$

Показано, что для пленочных течений параметр ε можно считать малым, и решение задачи (10) - (14) ищется в виде асимптотического разложения по ε . Нулевое приближение при $\varepsilon \rightarrow 0$ совпадает с классической задачей Нуссельта; получено её решение (в безразмерных переменных):

$$T = \frac{y}{\delta}; \quad u = (\tau + \delta)y - \frac{y^2}{2}; \quad v = -\frac{y^2}{2}\delta'; \quad (15)$$

$$\frac{1}{4}\delta^4 + \frac{\tau}{3}\delta^3 = x + C, \quad \delta(0) = \delta_*; \quad \text{Nu} = \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=\delta}. \quad (16)$$

Для неподвижного пара и спутного потока ($\tau \geq 0$) в уравнении и граничном условии (16) $C = 0$, $\delta_* = 0$, а при противотоке ($\tau < 0$) при нулевом расходе конденсата $\delta_* = -1.5\tau$, $C = \delta_*^4 / 4 + \tau\delta_*^3 / 3$.

Расчеты по модели (15), (16) показали, что спутный поток пара разгоняет и утоньшает пленку, что приводит к росту числа Nu . Противоток пара, напротив, тормозит и утолщает пленку, число Нуссельта снижается; при значительных $\tau < 0$ скорость на поверхности становится отрицательной, в пленке развиваются возвратные течения (рисунок 13).

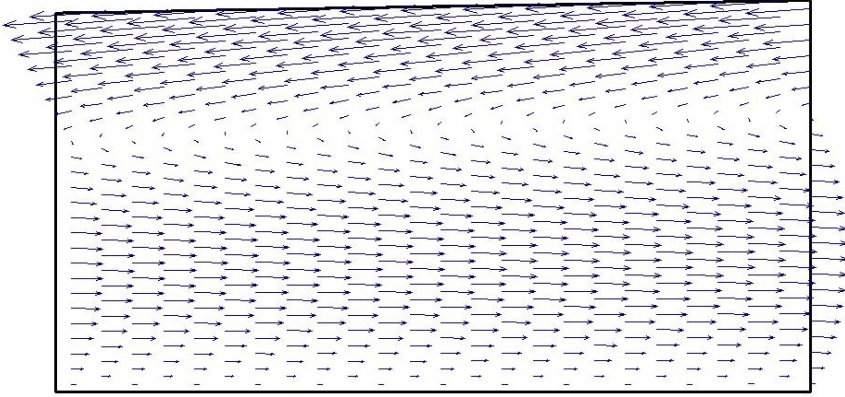


Рисунок 13. Поле скоростей в пленке конденсата
в режиме противотока $\tau = -0,5$.

Уравнение (16) имеет аналитическое решение для двух предельных случаев:

- неподвижного пара:

$$\delta = (4x)^{1/4}, \quad v = -\frac{y^2}{2\delta^3}, \quad u = \delta y - \frac{y^2}{2} \text{Nu} = (4x)^{-1/4}, \quad \langle \text{Nu} \rangle = \frac{2\sqrt{2}}{3}, \quad (17)$$

- быстрого спутного потока пара:

$$\delta = \left(\frac{3}{\tau} x \right)^{1/3}, \quad v = 0, \quad u = \tau y, \quad \text{Nu} = \left(\frac{\tau}{3x} \right)^{1/3}, \quad \langle \text{Nu} \rangle = \frac{(9\tau)^{1/3}}{2}. \quad (18)$$

Для определения границ применимости упрощенных формул (17), (18) был проведен ряд расчетов по полной модели (15), (16) для различных значений τ , которые показали, что выражения могут быть использованы вместо полной системы в случае малых скоростей движения пара при $|\tau| < 0,1$, а в случае быстрого движения пара при $\tau > 5$.

Задача для первого приближения в асимптотическом разложении учитывает инерционные члены уравнений. Для случаев неподвижного пара и быстродвижущегося пара получено аналитическое решение этой задачи. Результаты вычислений для случая неподвижного пара представлены на рисунок 14.

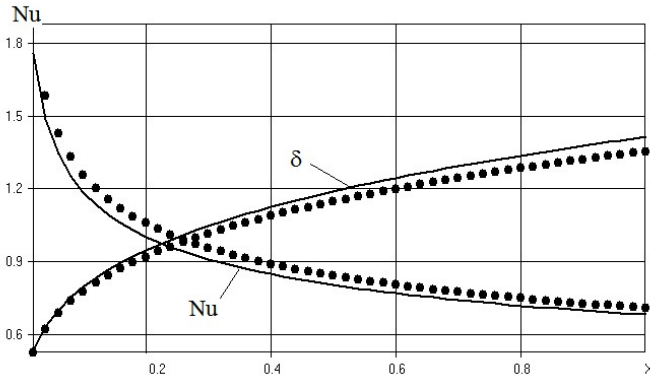


Рисунок 14. Нулевое (сплошная линия) и первое (пунктир) приближения для толщины пленки и местного числа Нуссельта при неподвижном паре

В случае быстродвижущегося пара получаются аналогичные результаты.

Видно, что для случая неподвижного пара использование первого приближения дает в среднем поправку порядка 10%, а в случае быстрого спутного потока - порядка 5%.

Основные выводы

1. Получено решение нелинейного дифференциального уравнения третьего порядка с малым параметром при старшей производной методом асимптотических сращиваний. Уравнение описывает течение пара в цилиндрическом канале испарителя при $Re \geq 100$. Полученные результаты удовлетворительно согласуются с известным точным решением и экспериментальными данными. Для $0 < Re \leq 40$ задача решена численно. Сравнение с известными данными дает различие $\approx 10\%$.

2. Выполнено численное моделирование задачи о течении пара в плоском канале со вдувом массы в пакете прикладных программ STAR CD в диапазоне $1 \leq Re \leq 100$. Поле скоростей совпадает с известными результатами. Показано, что для $y > 0.3$ поперечная скорость движения не зависит от продольной координаты; решения для скоростей практически не зависят от чисел Рейнольдса.

3. Сформулирована математическая модель и методика расчета испарения одиночной капли в горизонтальном потоке Пуазейля. Проведение

ны расчеты пространственного положения капли, вращения вокруг продольной оси собственной симметрии и времени полного испарения. В начальный период времени движение капли колебательное. Испаряющаяся капля с течением времени перемещается в нижнюю часть плоскости вертикальной симметрии и сдвигается к оси симметрии канала, скорость ее продольного движения возрастает, а вращение вокруг собственной продольной оси симметрии уменьшается.

4. Построена математическая модель процессов тепло- и массопереноса для пленочной конденсации на плоской вертикальной стенке с учетом конвекции и взаимодействия с внешним потоком пара. Получено приближенное аналитическое решение, обобщающее классическое решение задачи Нуссельта. Указаны режимы процесса, при которых применимы асимптотические приближения для неподвижного и быстро движущегося пара.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, определенных ВАК

1. Мингулов, Х.И. Течение испаряющейся пленки по плоской вертикальной стенке [Текст] / Н.И. Клюев, А.В. Мурышкин, Х.И. Мингулов // Вестн. СамГУ. Естественно-научная серия. - Самара, 2011. - № 8 (89). - С. 134-141.

2. Мингулов, Х.И. Течение пара в цилиндрическом канале испарителя [Текст] / Н.И. Клюев, Х.И. Мингулов, К.А. Поляков // Научное обозрение. - 2011. - № 5. - С. 347-353.

3. Мингулов, Х.И. Движение капли в градиентном потоке [Текст] / Н.И. Клюев, Х.И. Мингулов, Н.А. Бурмистров // Вестн. СамГУ. Естественно-научная серия. - Самара, 2012. - № 3/2 (94). - С. 24-28.

В других изданиях

4. Мингулов, Х.И. Взаимодействие стекающей пленки со встречным потоком пара в транспортной зоне термосифона [Текст] / Н.И. Клюев,

К.А. Поляков, Х.И. Мингулов // Системы обеспечения тепловых режимов преобразователей энергии: тр. Всерос. науч.-практ. конф. - Махачкала, 2008. - С. 28-32.

5. *Мингулов, Х.И.* Захлебывание противоточного кольцевого течения в цилиндрическом теплообменнике [Текст] / Н.И. Ключев, К.А. Поляков, Х.И. Мингулов // Обзорные прикладной и промышленной математики. - М., 2009. - Т. 16, вып. 5. - С. 861 - 862.

6. *Мингулов, Х.И.* Испарение капли в градиентном потоке воздуха [Текст] / Н.И. Ключев, Х.И. Мингулов // Материалы XXXII Всерос. конф. по проблемам науки и технологии. - М.: РАН, 2012. - С. 60-65.

Подписано в печать 22.04.2013 г.
Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Печать оперативная.
Объем 1 печ. л. Тираж 100 экз. Заказ №
Отпечатано в типографии ФГБОУ ВПО "СГЭУ".
443090, Самара, ул. Советской Армии, 141.

